

Über das Singen der Flammen.

Von J. Grailich und E. Weiss.

(Mit 1 Tafel.)

Herr Prof. Schrötter hat in einer Note über die chemische Harmonika ¹⁾ auf die interessante und merkwürdige Thatsache aufmerksam gemacht, dass beim Eintreten des Tönens, die Flamme nicht nur, wie es zuerst Trommsdorf beobachtete, sich nach aufwärts verlängert, sondern auch auf eine nicht unbeträchtliche Strecke in das Ausflussröhrchen selbst zurückbrennt, und hat in sehr treffender Weise diese Erscheinung einem successiven Auf- und Niederflackern der Flamme zugeschrieben. Wir gingen in unsern Versuchen von der erwähnten Thatsache aus, und gelangten dabei zu einigen Ergebnissen, welche über manchen, das Singen der Flammen betreffenden, bisher noch dunklen Punkt Licht verbreiten. Wir erlauben uns dieselben hier in Kürze mitzutheilen.

1. Das Hineinbrennen in das Ausflussröhrchen ist abhängig von der Gestalt der Mündung, der Intensität des Gasstromes und der Höhe des Tones.

Röhrchen, die in eine feine Spitze ausgezogen worden, zeigen unter übrigens gleichen Umständen das Hineinbrennen nur sehr wenig; konische Mündungen mit feiner Öffnung aber gar nicht. Wasserstoffgas zeigt es am vollkommensten bei gleichförmig cylindrischen Ausflussröhrchen bis zur Weite von 2 Linien, d. i. bis zu jener Weite, welche überhaupt noch das Eintreten des Tones zulässt. Dabei kann es geschehen, dass die Flamme nicht bloß in die Mündung selbst zurückbrennt, sie schlägt sogar nach aussen um das Ausflussrohr herab, wie eine feurige Cascade, und es kann die Dicke der herabgeschlagenen Flamme rings herum die des Lumens

¹⁾ Sitzungsberichte der k. Akademie d. Wissensch. Bd. XXIV, S. 18.

der Ausflussöffnung übertreffen, so dass im Durchmesser dieser Flammenwulst den aufsteigenden Gasstrom um das Dreifache und noch weiter übertrifft (Fig. 6). Ölbildendes Gas fordert durchaus eine engere Mündung des Ausflussrohres; es tönt am besten bei ziemlich spitzig-konischen Mündungen, und zeigt, dem entsprechend, das Hineinbrennen in minder auffallender Weise. Bei beiden Flammen findet übrigens schon im gewöhnlichen Verbrennen ein leichtes Eindringen der Flamme Statt, so tief nämlich der Sauerstoff der Luft unter den gegebenen Verhältnissen unverbrannt sich mit dem Gase zu mischen vermag. Die während des Tönens nach abwärts gerichtete Flamme des Wasserstoffgases ist meist etwas blässer röthlich, ja an ihrer untern Spitze selbst bläulich gefärbt, während wir nie eine andere Farbe als die blaue des verbrennenden Kohlenoxyd- und Wasserstoffgases an der zurückschlagenden Flamme des ölbildenden Gases wahrzunehmen Gelegenheit hatten. Es wird dieser Umstand später seine einfache Erklärung finden, eben so wie die gebotene Verschiedenheit in der Gestalt der Ausflussröhren bei verschiedenen Gasarten.

Mit der Weite des Ausflussröhrens steht die Geschwindigkeit des aufsteigenden Gasstromes in einer einfachen Beziehung. Es scheint, dass die absolute Menge des Gases, welches ausströmen und verbrennen muss, um in einer bestimmten Röhre einen bestimmten Ton zu erzeugen, zum Durchmesser der Ausflussröhre in einem nahezu constanten Verhältnisse steht. Soll der Ton rein bleiben, d. i. sollen nicht gleichzeitig der Grundton und die nächst höhere Octave durcheinander spielen, so muss der Gasstrom mässiger sein bei weiten Ausflussröhren als bei engen. Das Zurückschlagen der Flamme zeigt sich, wenn man diese Reinheit vernachlässigen will, bei Wasserstoffgas um so kräftiger, mit je grösserer Geschwindigkeit das Gas ausströmt. Ölbildendes Gas lässt, um das Hineinbrennen zu zeigen, nur eine geringe Geschwindigkeit des Gasstromes zu; so wie die Heftigkeit des Ausströmens nur etwas zunimmt, brennt es nicht nur nicht in die Röhre zurück, sondern die ganze brennende Flamme erhebt sich bis auf eine nicht unbeträchtliche Distanz über die Mündung des Ausflussrohres. Bei Ausflussröhren, welche in eine etwas längere feine cylindrische Spitze ausgezogen sind, kann es geschehen, dass das Verbrennen erst zwei Linien über der Öffnung eintritt, wobei die Flamme immer eine Länge von 4 bis 5 Linien erreichen kann.

Das Hineinbrennen geschieht um so kräftiger, je tiefer und stärker der Ton ist. Weite und lange Röhren zeigen es daher am deutlichsten. Wir sahen die Flamme des Wasserstoffgases, das aus einem gleichförmig cylindrischen Röhrechen von einer Linie Lumen ausströmte, in einer Röhre von 2 Zoll Durchmesser, deren Grundton 260 Schwingungen in der Secunde entsprach, $\frac{3}{4}$ Zoll tief in das Röhrechen zurückbrennen, fast ebenso tief als sie über die Mündung des Röhrechens sich erhob. Bei hohen Tönen ist das Phänomen immer nur bei kleinen Flammen, also bei geringer Ausströmungsgeschwindigkeit wahrzunehmen.

2. Wir lösten nun die tönende Flamme durch eine rasche Kopfbewegung, oder einen schnell rotirenden Spiegel in ihre Zeitelemente auf. Wir bedienten uns wie Tyndall eines mit Spiegelplatten belegten vierseitigen Holzprisma, dessen Axe so in der Handhabe angebracht war, dass es durch einen aufgewickelten Faden, oder auch nur den Finger in rasche Umdrehungen versetzt werden konnte.

Die Wasserstoffgas - Flamme löst sich in eine Reihe sehr schlanker Bilder auf; die emporschlagenden und nach abwärts gerichteten Zungen der Flamme folgen abwechselnd hinter einander; gewöhnlich so, dass die Flamme sich über die Mündung des Röhrechens erhebt, hierauf ein tiefes, bis an die Mündung reichendes Thal zeigt, wieder emporzüngelt u. s. f., und unter den tiefsten Punkten ein kleines, nach abwärts gerichtetes, an seiner untern Spitze bläulich gefärbtes Zünglein sich zeigt. Es scheint, dass die Flamme niemals unterbrochen wird, worüber nur an einem Punkte ihres Daseins ein Zweifel obwalten könnte, nämlich an der Mündung des Ausflussröhrechens selbst. Da diese durch die Hitze des verbrennenden Wasserstoffgases sogleich nach der Entzündung desselben zu glühen beginnt und dies Glühen im rotirenden Spiegel sich als feurige, ununterbrochene Linie darstellt, so könnte man eine Täuschung durch Irradiation als möglich annehmen. Aber da es schon an und für sich höchst unwahrscheinlich wäre, dass das Gas unentzündet diese glühende Stelle passirte, so könnte man die Continuität der Flamme schon hier als erwiesen hinnehmen, wenn nicht das Kohlenwasserstoffgas einen noch untrüglicheren Beweis dafür lieferte. Ist die Wasserstoffgasflamme so stark, dass sie sich im Tönen auch von aussen her um das Ausflussröhrechen legt, so zeigt der rotirende Spiegel, dass auch dieser

Theil der Flamme mit den emporzügelnden Spitzen intermittirt, und dass somit das Hineinbrennen und das seitliche Herabschlagen einer und derselben Phase angehört. Findet kein Hineinbrennen Statt, oder ist dies nur sehr gering, so zeigt die Basis der Flammenbilder immer doch Ausbuchtungen, welche auf ein successives Emporflackern und Herabschlagen deuten, wie dies in Figur 1 angedeutet ist.

Die Flamme des Kohlenwasserstoffgases zeigt unter allen Verhältnissen nahezu dieselbe Beschaffenheit, insofern wir nämlich nur die Basis derselben im Auge haben; merkwürdig und für die Erklärung des ganzen Phänomens nicht unwichtig ist dagegen das Aussehen der nach aufwärts gerichteten Flammenspitzen. Die Basis zeigt immer eine unsymmetrische, geschlängelte Form. Betrachtet man die Flamme von dem Momente an, wo das Emporbrennen beginnt, so sieht man die Basis sich rasch über die Mündung erheben, bis auf eine, von der Beschaffenheit des Ausflussröhrchens, der Stärke des Gasstromes und dem Tone der Luftsäule abhängige Höhe; so wie es diese erreicht hat, senkt sie sich mit minder steilem Falle entweder bis an die Ausflussmündung, und wenn Hineinbrennen stattfindet, auch in das Ausflussröhrchen. Von hier aus findet dann die Wiederholung desselben Verlaufes Statt. Die gleiche Unsymmetrie ist auch am Wasserstoffgas, jedoch wegen der bedeutenden Abbiegungen nach abwärts weniger deutlich wahrnehmbar. Die obere Grenzlinie der Flamme, wenigstens des blauen Theiles derselben, zeigt nun genau, wenn auch in kräftigeren Ausbiegungen diesen Verlauf wieder, so dass die Flamme bei ihrem Emporbrennen eine weit raschere Zunahme nach aufwärts zeigt, als beim Herabschlagen die Abnahme beträgt. Schon Schaffgotsch und Tyndall haben auf die von glühenden Kohlentheilchen herrührenden feurigen Sterne an den Spitzen der blauen Flammenberge aufmerksam gemacht. Ein genaueres Studium der Gestalt derselben blieb nicht ohne Nutzen für die Erklärung mancher, dem Kohlenwasserstoff eigenthümlicher Phänomene. So lange die Flamme schwach ist, sieht man nur schief aufgesetzte gelbe Kuppen von dem blauen Flammenberge abbiegen; je stärker die Flamme wird, desto länger wird diese seitliche Zunge, sie zeigt endlich ein von der blauen Flamme getrenntes Schlingeln; sie nähert sich mehr und mehr dem nächstfolgenden blauen Flammenberge, berührt diesen endlich, vereinigt sich mit der gelben Kuppe

desselben und bildet für sich ein eigenes schlängelndes System, dessen untere Grenzlinie ziemlich unregelmässig erscheint, während die obere in mässigen Ausbiegungen so auf- und niedergeht, dass die Wellenberge über die höchsten Stellen der blauen Flamme entfallen (Fig. 2, 3, 4). Es zeigt sich im Allgemeinen einmal eine gewisse Selbstständigkeit des gelben Flammentheils gegenüber dem blauen, und dann eine grössere Trägheit der Bewegung in den ersteren gegenüber der raschen Beweglichkeit des letzteren, während die Kohlenoxydflamme an Beweglichkeit wieder weit hinter der Wasserstoffgasflamme zurücksteht. Nie wurde die Spitze des gelben Flammenbündels auch nur halbwegs der Ausflussmündung genähert; noch viel weniger in oder um dieselbe herabgeschlagen.

3. Es handelt sich nun um die Erklärung dieser Erscheinungen. Bekanntlich schreibt Faraday und mit ihm Tyndall successiven Explosionen die Entstehung des Tones zu, mit welcher Ansicht auch die von Prof. Schrötter im Wesentlichen übereinstimmt. Hält es nun aber schon überhaupt schwer, sich vorzustellen, wie ein soleh' successives Explodiren eintreten soll, da doch bei einem Gasometer wenigstens ein gleichförmiger und steter Gasstrom emporsteigt, so nimmt die Schwierigkeit noch zu, wenn man folgende Erscheinung bei etwas abgeänderter Ausflussröhre erklären soll. Wird ein Glasröhrchen an seiner Spitze zugeschmolzen, dagegen etwas unterhalb der Spitze mit einer seitlichen Mündung versehen, so dass das Gas nicht gerade aufwärts, sondern nur seitwärts herausdringen kann, so stellt sich, bei Wasserstoffgas leichter als bei ölbildendem Gase, sehr bald das Tönen her, gerade wie bei der gewöhnlichen Form des Experimentes. Die Flamme zeigt aber dann keine Spur des Hineinbrennens; sie haftet vielmehr wie eine nach auf- und abwärts gerichtete Spindel an dem Glasrohre, indem sie fast eben so tief unter als über die Mündung schlägt. Die Analyse mit dem Spiegel zeigt nun deutlich, dass hier wenigstens von successiven Explosionen die Rede nicht sein kann. Die Flamme ist continuirlich, allerdings schwächer da, wo sie von dem tiefsten Thale nach aufwärts sich erhebt, aber im Ganzen doch nur ein ununterbrochenes feuriges Zickzack. Wird die Spitze des Ausflussröhrchens rechtwinklig abgebogen, so ist die Erscheinung weniger deutlich; erstens erlischt die Flamme zu leicht, und dann scheint der beträchtliche Seitendruck auch ungünstig auf die Erscheinung zu wirken. Eins aber geht aus

diesem Experiment mit voller Gewissheit hervor, die Thatsache nämlich, dass nicht successive Explosionen der Grund des Tönens sein können. Sind aber nicht sie der Grund, so muss dieser anderswo gesucht werden und es fragt sich nunmehr, wie entsteht der Ton in diesem Falle überhaupt, und dann, wie hängen die Phasen der Flamme mit der Bildung und Beschaffenheit des Tones zusammen.

4. Wenn in ein nach beiden Seiten offenes Glasrohr geblasen wird, so vernimmt man bekanntlich den Grundton der von dem Rohre umschlossenen Luftsäule. Es reicht hin, dass eine Verdichtungswelle durch die Röhre getrieben werde, um darin jene stehenden Schwingungen zu erzeugen, deren Knoten in die Mitte der Röhre entfallen. Wird ein Ausflussröhrchen in die Röhre gesenkt, und strömt Gas ohne Verbrennung aus, so wird, wenigstens bei solchen relativen Dimensionen, wie sie das Experiment der chemischen Harmonika erfordert, kein Tönen eintreten. Der blosse Stoss des ausströmenden Gases reicht nicht hin der Luftsäule jene schwingenden Bewegungen zu ertheilen. Wird aber das Gas entzündet, so tritt eine Action hinzu, welche an Fähigkeit, vibratorische Bewegungen zu erzeugen, jene dauernden Stösse des Gasstromes bei weitem übertrifft. Eine einfache Erwägung kann dies erweisen. Bei der Verbrennung eines Grammes Wasserstoffes werden nach Andrews (Phil. Magaz. 1832, 321) 33808, bei der Verbrennung eines Grammes Kohlenoxydgas 2431, eines Grammes ölbildenden Gases 11942 Wärmeeinheiten frei. Die gesammte lebendige Kraft, welche hier als Wärme auftritt, diente dazu, die natürliche Spannung zwischen den einzelnen Theilchen der ursprünglichen Gasarten zu erhalten.

Die Producte der Verbrennung von Gasen, wenn sie selbst wieder gasförmig sind, müssen daher nothwendig dichter sein als die ursprünglichen Gasarten, und es werden die angegebenen Zahlen einen Massstab darbieten, um zu beurtheilen, wie viel die Volumänderung bei gleichem Druck beträgt, wenn irgend ein brennbares Gas mehr Sauerstoff zu einem oder einigen neuen Gasen verbrennt. Wir ziehen diese Betrachtungsweise der Vergleichung der Dichten vor, weil die relativen Dichtenangaben doch nur innerhalb gewisser Temperaturgrenzen richtig sind, welche den glühenden Zustand der Gase nicht in sich schliessen; man wird aber natürlich zu keinem widersprechenden Ergebnisse gelangen, wenn man zur ersten Annäherung die Gasdichten selbst bei gewöhnlicher Temperatur vergleicht. Es ist

nun begreiflich, dass die mit der Verbrennung untrennbar verbundenen Volumänderungen genau dasselbe bewirken müssen was ununterbrochene Explosionen. Ununterbrochen strömt Sauerstoff der Flamme zu, um sie verbunden mit dem Wasserstoff und Kohlenstoff derselben wieder zu verlassen. Die dadurch innerhalb der ganzen Röhre bewirkte Unruhe reicht hin, in der Luftsäule jene schwingenden Bewegungen zu erregen, die sich schliesslich zu stehenden Schwingungen anordnen. Es ist freilich der Gang dieser inneren Action nicht für ein einzelnes Theilchen zu verfolgen, aber das kann man auch für die Entstehung irgend eines gewöhnlichen Pfeifentones oder eines homogenen Lichtstrahles nicht leisten. Die initialen Zustände entziehen sich überall der Wahrnehmung nicht minder als der Berechnung und es genügt, nachgewiesen zu haben, dass die bekannten Grundbedingungen zur Tonbildung in unserem Falle nicht fehlen. Es wurde auch dem aufsteigenden Luftstrom ein nicht unbedeutender Antheil an der Entstehung des Tones vindicirt und es ist nicht zu bezweifeln, dass auch er unterstützend mit eintreten kann; wesentlich aber ist er kaum; wir fanden, dass Röhren in horizontaler Lage so gut tönen als in verticaler und alle Erscheinungen des Hineinbrennens u. s. w. deutlich wahrnehmen lassen, sobald man nur dafür sorgt, dass Sauerstoff fort und fort zuströmen, Wasserdampf und Kohlensäure aber abströmen kann; es ist dabei gleichgiltig, an welcher Stelle innerhalb des Rohres Sauerstoff zuströmt, wenn dies nur nicht allzufern von der brennenden Flamme geschieht.

5. Wenn durch das Mundstück einer Pfeife geblasen und ein Ton hervorgerufen wird, so befindet sich der Mund nicht innerhalb der stehenden Welle; das fortdauernde Blasen kann also auch keine Störung in die Bewegung der Luftsäule bringen. Anders ist es in unserem Falle. Hier steckt der Pfeifer in der Luftsäule mitten inne.

Es ist begreiflich, dass unter diesen Umständen die Ausbildung jeder stehenden, periodischen Bewegung unmöglich wird, so lange die Anregung zur Bewegung gleichmässig von einem und demselben Orte ausgeht. Aber die Flamme ist selbst Luft; als Ganzes schliesst sie sich jenen Bewegungen an, die auf Anregung der heftigen, stürmischen und unregelmässigen Bewegung ihrer kleinsten Theilchen in der mit selbstständiger Elasticität begabten Luftsäule hervorgerufen worden. Der Ton kann somit erst entstehen, wenn die Luftsäule und Flamme als ein System gleichzeitig vibriren. Die Flamme liefert die

bewegende Kraft, die Elasticität der Luftsäule die Form dieser Bewegung. Unter diesem Gesichtspunkte erklärt sich nun vieles einfach, was auf anderem Wege nur schwer oder gar nicht auszulegen war. Ein Wachskerzchen, und wenn auch noch so klein, ist nicht im Stande einen dauernden und deutlichen Ton zu geben. Der fettgetränkte Docht ist nämlich ein Ort ununterbrochener Verbrennung, der sich der Bewegung nicht anzuschliessen vermag. Die sonderbare Form der Kohlenwasserstoffflamme, für welche Tyndall eine ziemlich künstliche Auslegung angibt, erklärt sich einfach aus der grösseren Masse, folglich auch Trägheit der schwebenden Kohlentheilchen. Während das blaue Gas mit Leichtigkeit sich der Bewegung der Luft anschliesst, bleiben die Kohlentheilchen bald zurück, und es erscheint deshalb der gelbe Theil der Flamme getrennt von dem blauen. Das Zurückschlagen der Flamme in das Ausflussröhrchen, welches sich nach der Ansicht der successiven Explosionen immerhin erklären liesse, das äusserliche Herabschlagen, welches aber darin gar keine Erklärung findet, wird nun leicht verstanden. Das successive Auf- und Niederflackern bei seitlicher Öffnung; die Unterstützung der Tonbildung durch das Anschlagen des Grundtones mit der Stimme oder einem musikalischen Instrumente, die Möglichkeit des Auslöschens auf demselben Wege, kurz die ganze interessante Reihe der Versuche des Grafen Schaffgotsch findet in einfacher Weise ihre Erklärung in unserer Anschauungsweise. Steht die Flamme an einer solchen Stelle der Röhre, dass sie im Stande ist den dort durch die Interferenz der Partialwellen angeregten Ausschlägen zu widerstehen, oder steht sie überhaupt zu tief, d. i. zu nahe der unteren Mündung, so kann eine äussere Unterstützung die schwingende Bewegung, nach welcher die Tendenz in der ganzen Röhre vorhanden ist und für deren Zustandekommen nur noch der ruhende Zustand der Flamme störend ist, hervorrufen. Und umgekehrt ist auch das Verlöschchen in gleicher Weise leicht verständlich. Man wird auch die Unsymmetrie in der Gestalt der einzelnen Flammentheilchen nothwendig finden, da beim Emporbrennen die Bewegung der Luft durch die Richtung des Gasstromes unterstützt, beim Zurückschlagen aber gehemmt wird.

Eben so ist es begreiflich, dass eine Flamme um so schwerer tönt, je geringer die Verbrennungswärme und je unvollständiger die Verbrennung selbst ist.

Man kann daher wohl sagen, dass unter den gewöhnlichen Umständen das Tönen von successiven Explosionen begleitet sei; aber diese Explosionen sind nicht der Grund, sondern eher die Folge des Tones.

Chladni, der in der chemischen Harmonika nur eine modificirte Pfeife sieht, dem aber die Auflösung der Flamme in die einzelnen Phasenbilder noch unbekannt war, erklärt die Erscheinung ohne Berücksichtigung des Vorganges mit der Flamme in ähnlicher Weise wie den Pfeifenton; doch scheint es, dass gerade die Bewegungen der Flamme das Fragliche an der Erscheinung waren.

Da die Flamme nicht an allen Punkten der Röhre gleich leicht den Ton zu wecken vermag, in sofern als hier eine Aufgabe des Zusammenstimmens zweier Systeme vorliegt, so ist die Annahme de la Rive's, dass es in der Röhre gewisse *points sonores* gebe, nicht unbedingt zu verwerfen, wenn auch nicht in de la Rive's Sinne auszulegen. Es sind eben Punkte, in denen Bedingungen von zweierlei Ordnung gleichmässig ihre Erfüllung finden.

6. So wie bei den Chladnischen Klangfiguren der Sand zur Darstellung der Knotenlinien benützt wird, kann ein kleines aus feinen Ausströmungsröhren brennendes Flämmchen zum Nachweis der Knotenflächen innerhalb einer tönenden Luftsäule benützt werden. Wird in ein weites Glasrohr Sauerstoff geleitet, indem ein an mehreren Stellen durchbohrtes feines Glasrohr längs der einen Wand des weiteren Rohres das Gas zuführt, so kann in der auf solche Weise gewonnenen Sauerstoffatmosphäre ein Flämmchen auch bei horizontaler Lage der Röhre an allen Stellen brennen (Fig. 7). Man führt nun ein dünnes, in eine feine Spitze ausgezogenes Röhrchen, dessen Ausflussstelle knieförmig aufgebogen ist, in das weite Rohr, die Ausflussstelle genau in die Mitte desselben. Wird nun Gas durch das Röhrchen getrieben und angezündet, so brennt es eine Weile ruhig fort; so wie aber an der einen Mündung der grossen Röhre eine starke Wasserstoffgasflamme eindringt, entspinnt sich ein offener Conflict zwischen den beiden Flammen, der gewöhnlich mit dem Erlöschen des Flämmchens und der Bildung des Grundtones endigt. Wird aber umgekehrt das Sonderöhrchen zwar bis in die Mitte eingeführt, jedoch das Gas nicht entzündet, und nur die starke Wasserstoffgasflamme zur Erzeugung des Grundtones verwendet, so kann durch einen glühenden Holzspan das Flämmchen entzündet

werden und es brennt nun fort, ohne durch den Ton beirrt zu werden, oder auch den Ton zu stören. Sobald aber das Röhrechen um ein geringes aus der Mitte verrückt wird, erlöscht es alsbald. Man muss mit horizontalen Röhren operiren, da bei verticalen der Luftzug zu kräftig ist. Ausser dem Grundtone kann auch die nächst höhere Octave, kurz jeder Ton, der in der Röhre möglich ist, sobald die Knoten einander nicht zu nahe liegen, mit dem Sonderöhrchen studirt werden. Es ist am vortheilhaftesten zur Erregung des zu prüfenden Tones eine kräftige Wasserstoffflamme, zum Nachweis der Knotenflächen aber eine etwas trägere Flamme, wie die des Kohlenwasserstoffes, zu verwenden.
